

УДК 537.533.3

## Методы снижения уровня радиальной составляющей магнитной индукции на оси рабочих каналов магнитных фокусирующих систем электровакуумных приборов

К. Л. Сергеев, А. А. Лукин, П. И. Акимов, Д. В. Козырев

*Исследованы методы снижения уровня радиальной составляющей магнитной индукции на оси рабочих каналов магнитных фокусирующих систем электровакуумных приборов. Показано, что за счет более точного размагничивания прессовок в процессе изготовления секторных магнитов и частичного их размагничивания перед сборкой, а также использования постоянных магнитов со специальной петлей гистерезиса можно существенно уменьшить радиальную составляющую магнитных периодических систем большого диаметра.*

PACS 41.20.Gz

*Ключевые слова:* остаточная магнитная индукция, коэрцитивная сила по намагниченности, коэрцитивная сила по индукции, магниты типа Nd—Fe—В, магнитная реверсная фокусирующая система.

### Введение

Для решения ряда технических задач по фокусировке пучков заряженных частиц в рабочих каналах электровакуумных приборов (ЭВП) эффективно используются магнитные системы с редкоземельными магнитами с радиальной текстурой (намагничиванием). Известны технические решения по созданию колец с радиальной текстурой с использованием таких технологических приемов как горячее изостатическое прессование или частичная разориентация текстуры при прессовании магнитотвердого порошка в магнитном поле (создание радиально-азимутальной текстуры) [1].

Таким образом, получены постоянные магниты на базе сплава типа неодим—железо—бор с радиальной (или близкой к ней) текстурой с внешним диаметром до 100 мм. Однако создание цельнопрессованных кольцевых редкоземельных магнитов с радиальной текстурой больших размеров, в частности с диаметром 210 мм и более, весьма затруднительно в производстве, так как для этого требуется создание магнитных полей (более 2400 кА/м) в значительном объеме (больше размеров магнитов) при прессовании и намагничивании. При этом в ряде случаев возникает необходимость

создания градиентных магнитов с различными значениями таких параметров как остаточная магнитная индукция ( $B_r$ ) и коэрцитивная сила по намагниченности ( $H_c$ ), по объему магнита. Поэтому в промышленности используются составные магниты (магнитные системы) из секторов соответствующих размеров. Однако создание составных магнитов порождает другие проблемы, в частности появление неоднородностей магнитного потока, из-за технологического разброса магнитных параметров секторных магнитов даже в пределах одной партии, а также сложностью частичного размагничивания до заданных значений магнитной индукции термостабильных магнитов с высокой степенью квадратности размагничивающей части петли гистерезиса.

Цель исследования — выявление и устранение причин неоднородности магнитного поля в рабочем объеме системы на основе составных редкоземельных магнитов с радиальной текстурой.

### Методика эксперимента

Постоянные магниты в виде дисков и секторов следующего химического состава, ат. %:  $(\text{Nd,Pr,Dy,Tb,Gd,Ho})_{13-15}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{\text{bal}}(\text{Al,Ga,Cu})_{0,2-1,0}(\text{B,C})_{6-9}$ , где  $x = 0,2-0,3$ , изготавливали методом порошковой металлургии, включающем в себя следующие технологические операции: выплавку сплава, получение порошка со средним размером 3—4 мкм в защитной атмосфере, прессование порошка в магнитном поле, спекание при температурах 1300 К с последующей термической обработкой (1175 К, 3,6 кс, охлаждением со скоростью 0,02 К/с до 675 К

Сергеев Константин Леонидович, главный конструктор.  
Лукин Александр Александрович, зам. ген. директора.  
ООО «НПК "Магниты и магнитные системы"».

Россия, 127238, Москва, Дмитровское шоссе, 58.

E-mail: nprkms@mail.ru; kesergeev@mail.ru

Акимов Павел Иванович, начальник отдела.

Козырев Денис Васильевич, начальник лаборатории.

НПП "Горий".

Россия, 117393, Москва, ул. Обручева, 52.

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2009 г.

и выдержкой при этой температуре в течение 3,6—36 кс; с последующей выдержкой при 775 К — 3,6 кс).

При изготовлении ряда магнитов использовали метод механического легирования [2]. Намагничивание осуществляли в импульсных магнитных полях до 3500 кА/м. Выравнивание (стабилизацию) магнитных параметров проводили путем частичного размагничивания с помощью обратного импульсного или постоянного магнитного поля либо путем нагрева магнитов до определенной температуры. Контроль магнитных параметров осуществляли как по магнитному потоку, так и по полю в заданных точках, на секторах магнитов и контрольных образцах-свидетелях (магнитах в виде дисков Д48×8,5) с помощью гистериографа до 2000 кА/м при 300 К и до 1280 кА/м — при  $T = 300\text{—}473$  К. Доменную структуру магнитов исследовали на плоскостях, перпендикулярных оси текстуры, методом полярного магнитооптического эффекта Керра и на плоскостях, параллельных оси текстуры, методом магнитной суспензии [2]. После всех технологических операций дисковые или секторные магниты представляли собой текстурованные монокристаллические зерна на основе интерметаллического соединения  $R_2(Fe,M)_{14}(B,C)$ , скрепленные немагнитной связкой, на основе обогащенных редкоземельными элементами соединений.

В качестве объекта измерений составляющих магнитной индукции в рабочих каналах изделия была выбрана магнитная реверсная фокусирующая система (МРФС) двухпролетного клистрона, состоящая из трех радиально намагниченных колец в магнитомягкой арматуре, установленных на имитаторе прибора. Каждое кольцо состояло из 12 секторных магнитов  $\varnothing 210 \times \varnothing 180 \times 20 \times 30^\circ$  и 12 секторных магнитов  $\varnothing 180 \times \varnothing 152 \times 20 \times 30^\circ$ .

### Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1, а представлены размагничивающие части петель гистерезиса постоянных магнитов типа  $(Nd, Pr, Dy, Tb, Gd)_{13-15}(Fe_{0,78}Co_{0,22})_{ост.}(Al, Cu)_{0,8-1,0}(B,C)_{8,5}$ , измеренные на образцах-свидетелях диска Д48×8,5 при различных температурах (остаточная магнитная индукция:  $B_r = 1,09$  Тл, коэрцитивная сила по намагниченности:  $H_c = 1680$  кА/м, максимальное энергетическое произведение:  $BH_{max} = 230$  кДж/м<sup>3</sup> при 300 К). С повышением температуры остаточная магнитная индукция и коэрцитивная сила уменьшаются в соответствии с температурными коэффициентами индукции (-0,056) и коэрцитивной силы по намагниченности.

Значения температурного коэффициента  $H_c$  в различных температурных интервалах приведены ниже.

| Температурный коэффициент $H_c$ | Температурный интервал, К |
|---------------------------------|---------------------------|
| 0,600.....                      | 300—355                   |
| 0,575.....                      | 355—375                   |
| 0,550.....                      | 375—395                   |
| 0,510.....                      | 395—425                   |
| 0,480.....                      | 425—455                   |
| 0,465.....                      | 455—475                   |

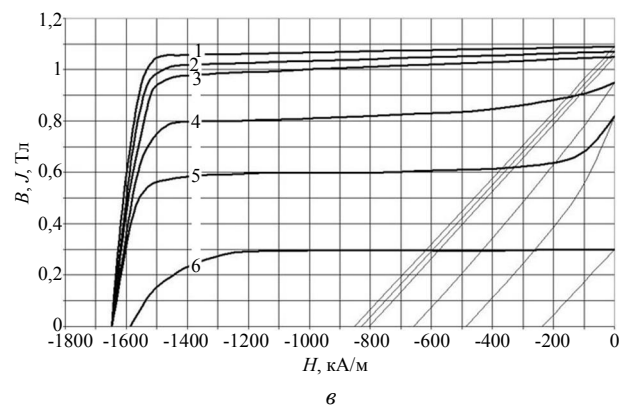
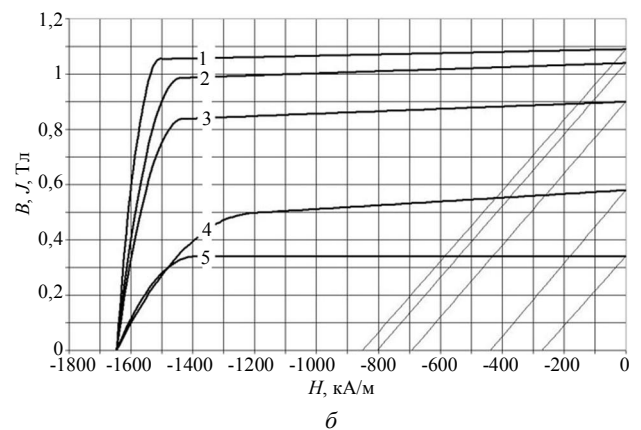
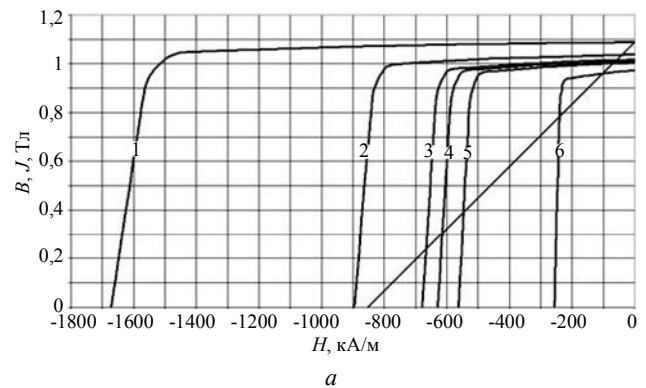


Рис. 1. Размагничивающие части петли гистерезиса постоянного магнита:

а — при различных температурах: 1 — 293 К; 2 — 373 К; 3 — 403 К; 4 — 413 К; 5 — 423 К; 6 — 473 К;  
 б — при частичном размагничивании импульсными полями: 1 — 100 %; 2 — 95,4 %; 3 — 82,5 %; 4 — 53 %; 5 — 31 % от первоначальной намагниченности;  
 в — при частичном размагничивании воздействием температуры: 1 — 300 К; 2 — 403 К; 3 — 413 К; 4 — 423 К; 5 — 453 К; 6 — 473 К

На рис. 1, б представлены размагничивающие части петель гистерезиса этих же постоянных магнитов после частичного размагничивания импульсными полями (длительность импульса составляла ~10 мс) с увеличивающейся амплитудой; как видно из этих графиков, практически до полей 1400—1500 кА/м сохраняется горизонтальный участок с последующим резким падением намагниченности в узком интервале магнитных полей. Это указывает на высокую однородность магнитов по коэрцитивной силе по намагниченности, а также на то, что процесс размагничивания осуществляется за счет перемагничивания (а не размагничивания с образованием магнитной доменной структуры) отдельных монокристаллических зерен. Характер графиков не изменялся и при использовании стационарных размагничивающих полей с помощью гистериографа.

На рис. 1, в представлены размагничивающие части петель гистерезиса постоянных магнитов после размагничивания путем последовательного нагрева до различных температур (от 300 до 473 К).

Если при температурах 300, 403, 413, 473 К характер изменения магнитных параметров был похож на магниты, размагниченные обратным полем (см. рис. 1, а), то при температурах 423 и 453 К наблюдается в относительно небольших полях резкий рост магнитной индукции. Такое поведение магнитов можно связать с тем, что значительная часть их зерен не перемагничивается в обратном исходному направлении, а размагничивается с образованием доменной структуры. Похожий ход кривых размагничивания наблюдался нами при исследовании влияния на него величины намагничивающего поля. Характерный изгиб кривых в малых размагничивающих полях наблюдался при намагничивании в полях 900 кА/м. В полях 1200—1600 кА/м этот изгиб исчезал. Этим полям для данного класса материалов оказывается достаточно при намагничивании из терморазмагниченного состояния. Аналогичный вид (с изгибом вблизи малых полей) кривых размагничивания наблюдался при комплексном (магнитное поле + температура) размагничивании до уровня 30—70 % от исходного состояния. Однако этот эффект не наблюдался при комплексном размагничивании: обратное магнитное поле с последующим нагревом до температур 423—453 К.

Анализ доменной структуры подтвердил тот факт, что характерный изгиб на кривых размагничивания обусловлен размагничиванием части зерен магнита с образованием внутри них доменной структуры. При размагничивании обратным полем из-за высокой однородности коэрцитивности зерен характер доменной структуры определяется магнитостатическим взаимодействием и представ-

ляет собой вертикальные "каналы" перемагниченных зерен в местах с максимальным размагничивающим фактором с более разветвленной структурой у полюсных поверхностей аналогично магнитам типа  $\text{SmCo}_{5-x}(\text{Si},\text{Ni})_x$  [2—4].

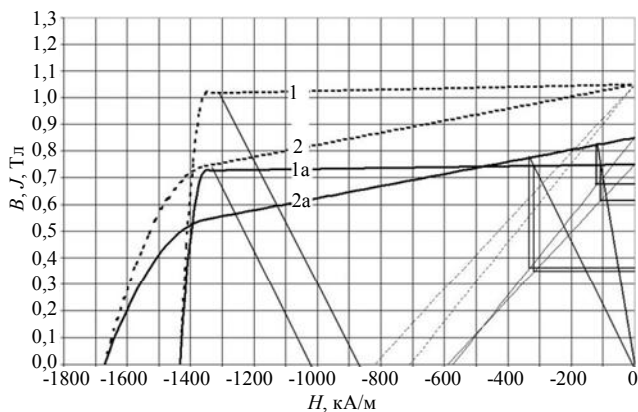
На дисковых магнитах получены аналогичные закономерности при недостаточном магнитном поле при намагничивании (особенно для случая, когда требовалось намагничивание магнитов, ранее подвергавшихся действию магнитного поля). Аналогичные закономерности наблюдали и на магнитах других химических составов данной группы, поэтому секторные магниты исследовали на одном химическом составе.

Исходя из анализа полученных экспериментальных данных, для калибровки использовался только метод частичного размагничивания обратным магнитным полем. Если же по техническим условиям требуется термическая стабилизация, то последующий нагрев возможен без ущерба однородности потока до 400 К.

Несмотря на прецизионное изготовление магнитов, обычно возникают проблемы, связанные с появлением радиальной составляющей магнитного потока в собранной системе, когда использовали постоянные магниты из разных партий, даже при одинаковых  $B_r$  и  $H_c$  после размагничивания обратным полем до заданного значения, но с разной квадратностью петли гистерезиса.

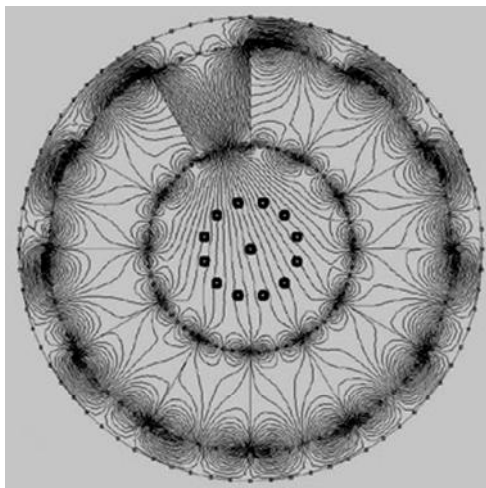
Так как после частичного размагничивания отдельных секторных магнитов до заданного значения и сборки их в систему рабочая точка магнитов (размагничивающий фактор) может существенно измениться, то это может привести к тому, что магниты, имеющие одинаковую плотность потока на рабочей поверхности до сборки, в составе системы уже имеют существенные различия по индукции. В качестве примера такой случай продемонстрирован на рис. 2. Данное явление может привести к появлению неоднородности магнитных параметров составного секторного магнита с радиальной текстурой и нежелательной радиальной составляющей в фокусирующей системе.

На рис. 3 показана картина силовых линий центрального сечения секции МРФС при отклонении исходных (до калибровки) магнитных свойств (в частности, квадратности размагничивающей части петли гистерезиса) и свойств отдельного магнита от общего уровня. Видно, что отклонение в величине магнитного потока отдельного сектора приводит к появлению составляющей магнитной индукции, направленной поперек осей рабочих каналов. При этом влияние данной составляющей магнитной индукции распространяется не только на зону вблизи полюсного наконечника, но и далее в рабочие каналы системы.



**Рис. 2. Размагничивающие части петли гистерезиса двух образцов постоянного магнита при частичном размагничивании импульсными полями:**

1 — образец 1 в исходном состоянии; 1а — образец 1 частично размагничен; 2 — образец 2 в исходном состоянии; 2а — образец 2 частично размагничен



**Рис. 3. Картина силовых линий центрального сечения секции МРФС**

Чтобы уменьшить вышеописанный эффект, при сборке секций МРФС необходимо устанавливать секторные магниты в секцию таким образом, чтобы магниты, размагниченные до заданного уровня одним и тем же (или близким) по величине обратным полем, оказывались бы напротив друг друга.

Еще одна проблема появилась вследствие проведения работ по улучшению качества постоянных магнитов. Повышение однородности магнитов и квадратности петли гистерезиса привело к сложности обеспечения точности частичного размагничивания до заданных величин. Поэтому была предпринята попытка изготовления магнитов методом механического легирования с учетом их определенной специфики.

Следующая партия секторных магнитов была изготовлена этим методом из сплавов двух химических составов с различными значениями остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы по намагниченности. Петля имела высокую квад-

ратность, за исключением более плавного участка вблизи коэрцитивной силы по намагниченности в интервале 80—120 кА/м. Это позволило более точно размагничивать прессовки после компактирования в магнитном поле и частично размагничивать магниты до заданного значения.

Большое влияние на однородность радиального кольца имеет также и способ измерений при настройке и аттестации секторных магнитов. Традиционный способ измерения магнитной индукции датчиком Холла в центре хорды сектора не является корректным. Во-первых, данная точка находится в высокоградиентной зоне, что приводит к методическим ошибкам измерения. Во-вторых, размагничивающий фактор середины и краев сектора различен. В силу этого плотность потока в локальной точке вблизи центра не может полностью характеризовать суммарный поток с полюса магнита. Так, на практике при частичном размагничивании секторных магнитов в процессе настройки полученный разброс значений индукции в контрольной точке ограничивается значением  $\pm 1\%$ , а разброс значений измеренного магнитного потока с полюса у этих же магнитов достигает 66%.

Более предпочтительным является интегральное измерение потока с полюса. Это может быть реализовано либо с помощью индукционных катушек, либо посредством концентрации потока в контрольную точку с помощью магнитомягкой арматуры, либо другим способом.

В настоящее время проводятся работы по выбору оптимального способа измерения контрольного параметра сектора, наиболее полно характеризующего поток с полюса магнита и в то же время удобного и технологичного.

С учетом результатов проделанных исследований на практике были проведены мероприятия по сборке и настройке МРФС двухпролетного клистрона. После этих операций улучшилось заданное (расчетное) распределение составных радиальных колец, что в конечном счете привело к снижению радиальной составляющей магнитной индукции в рабочих каналах изделия с уровня 0,030 до уровня 0,016 Тл (т. е. почти в два раза). Это позволило существенно увеличить токопрохождение в приборе.

### Заключение

Показано, что за счет более точного размагничивания прессовок в процессе изготовления секторных магнитов и частичного размагничивания постоянных магнитов перед сборкой, правильного выбора способа частичного размагничивания, а также применения постоянных магнитов со специ-

альной петлей гистерезиса, полученных с использованием технологии механического легирования, можно существенно повысить однородность составных радиальных колец и уменьшить радиальную составляющую в рабочих каналах МРФС.

#### Л и т е р а т у р а

1. Лукин А. А., Матвеев А. П., Дормидонтов А. Г., Скуратовский Ю. Е., Шаморикова Е. Б., Логачев А. В. Исследование горячего изостатического прессования на магнитные

свойства кольцевых магнитов с радиальной текстурой// Сб. Ракетная техника. Сер. 8. Вып. 3. 1990. С. 73—78.

2. Глебов В. А., Лукин А. А. Нанокристаллические редкоземельные магнитотвердые материалы. — М.: Изд-во ВНИИИМ, 2007. С. 179.

3. Лилеев А. С. Особенности процессов перемагничивания высокоанизотропных одноосных ферромагнетиков// Известия РАН. Сер. Физическая. 2007. Т. 71. № 11. С. 1560—1562.

4. Kobayashi K., Sakamoto S., Matsushita T., Hayakawa K., Sagawa M. Magnetic reversal in groups of crystal grains in sintered Nd—Fe—B magnets// Proc. 20th Int. Workshop on RE Magnets and their Applications. 2008. Knossos Proc. 12th Int. Workshop on RE Magnets and their Applications. — Crete. September 8—10. Crete. P. 138—143.

## Methods of reduction in the level of the radial constituent of magnetic induction on the working channels axis of magnetic focusing systems for electrovacuum devices

*K. L. Sergeev, A. A. Lukin*

Research and Production Company "Magnets and Magnetic Systems", 58 Dmitrov road, Moscow, 127238, Russia

E-mail: npkmms@mail.ru; klsergeev@mail.ru

*P. I. Akimov, D. V. Kozyrev*

Federal Research and Production Company "Thoriy", 52, Obruchev str., Moscow, 117393, Russia

*Methods of reduction in a level of a radial constituent of magnetic induction on the working channels axis of magnetic focusing systems of electrovacuum devices are investigated. It is shown, that for the account of exacter pressings demagnetization during manufacturing sector magnets and partial demagnetization before assembly, and also use of constant magnets with a special loop of a hysteresis, it is possible to reduce essentially a radial component of induction for magnetic focusing systems of the big diameter.*

PACS 41.20.Gz

*Keywords:* remaining magnetic induction, coercitivity on magnetized, coercitivity on induction, magnets of type of Nd—Fe—B, magnetic reverse focusing system.

Bibliography — 4 references.

*Received 18 November 2009*